

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Transporta un mašīnzinību fakultāte

Mehānikas institūts

Marina GRIŠČENKO

Doktora studiju programmas «Inženiertehnika, mehānika un mašīnbūve. Lietišķā mehānika»
doktorante

**HIDROAGREGĀTU VIBRODIAGNOSTIKAS
PAPILDINĀŠANA AR ĢENERATORA GAISA SPRAUGAS
MONITORINGU**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji
profesors *Dr. habil. sc. ing.*

J. VĪBA

profesors *Dr. sc. ing.*

J. AUZIŅŠ

RTU Izdevniecība

Rīga 2015

Griščenko M. Hidroagregātu vibrodiagnostikas
papildināšana ar ģenerators gaisa spraugas
monitoringu. Promocijas darba kopsavilkums.
— R.: RTU Izdevniecība, 2015. — 20 lpp.

Iespiests saskaņā ar mehānikas institūta
2014. gada 11. novembra lēmumu, protokols
Nr. 10 .

ISBN 978-9934-10-713-9

**PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU
DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ
UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2015. gada plkst..... Rīgas Tehniskās universitātes Transporta un mašīnzinību fakultātē, Ezermalas ielā 6, 310. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Rihards Indriksons
Latvijas Jūras akadēmija

Profesors *Dr. sc. ing.* Igors Tipāns
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors *Dr. habil. sc. ing. Rafal Chatys*
Kielces Tehniskā universitāte, Polija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājusi šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Marina Griščenko(Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, 7 nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 63 attēli un 49 tabulas, kopā 150 lappuses. Literatūras sarakstā ir 132 nosaukumi.

SATURS

VISPĀRĪGS DARBA RAKSTUROJUMS.....	5
1. HIDROAGREGĀTU VIBRODIAGNOSTIKA.....	8
2. HIDROAGREGĀTA MATEMĀTISKAIS MODELIS	9
3. SISTĒMAS KRITISKĀS FREKVENCES	10
4. GAISA SPRAUGAS MEHĀNISKĀ NEVIENMĒRĪBA	11
5. MAGNĒTISKĀ LAUKA NEVIENMĒRĪBA.....	14
6. GAISA SPRAUGAS MĒRĪŠANA	14
7. GAISA SPRAUGAS NOVĒRTĒŠANA.....	15
SECINĀJUMI	17
GALVENO IZMANTOTO AVOTU SARAKSTS.....	19

VISPĀRĪGS DARBA RAKSTUROJUMS

Darbs izstrādāts par Daugavas hidroelektrostaciju (HES) kaskādē uzstādītajiem hidroagregātiem un ir veltīts ražošanas mašīnu vibrāciju izpētei un vibrāciju monitoringa uzlabošanai.

Tēmas aktualitāte

Ar kvalitatīvu hidroagregātu tehniskā stāvokļa diagnostiku var novērst avārijas gadījumus, izvairīties no neparedzētām izmaksām un dīkstāvēm, kā arī precīzāk saplānot lielo hidroģeneratoru remontdarbus. Mērīšanas metodikas pilnveidošanai nepieciešams izstrādāt sistēmu rezultātu analīzei, jo rezultātu kvalitatīva analīze un informācijas uzkrāšana par katru konkrēto agregātu ir efektīvākais veids, kā nonākt no iekārtas stāvokļa monitoringa līdz pilnvērtīgai diagnostikai.

Mērķis

Darba mērķis ir izstrādāt metodiku gaisa spraugas mērīšanai un novērtēšanai Daugavas HES kaskādē uzstādītajiem hidroagregātiem, kas var uzlabot to vibrācijas diagnostikas kvalitāti, jo gaisa spraugas nevienmērību ietekmē praktiski katra hidroagregāta konstrukcijas detaļa.

Uzdevumi

Lai sasniegtu noteikto mērķi un izstrādātu metodiku gaisa spraugas mērīšanai un novērtēšanai, tika noteikti šādi uzdevumi:

- 1) esošās gaisa spraugas mērīšanas metodikas izpēte un izvērtēšana;
- 2) hidroagregāta matemātiskā modeļa izstrāde, kurā būtu apskatīti mehāniskie spēki, kas darbojas uz hidroagregātu, kā arī ņemtas vērā Daugavas HES kaskādē uzstādīto hidroagregātu konstruktīvās īpatnības;
- 3) sistēmas pašsvārstību frekvenču un kritisko ātrumu aprēķins;
- 4) gaisa spraugas matemātiskā modeļa izstrāde un iespējamo mehānisko defektu apraksts;
- 5) aprēķina metodikas papildināšana ar elektriskiem spēkiem, kas raksturīgi hidroģeneratoriem, ņemot vērā hidroagregātiem veiktās konstruktīvās izmaiņas rekonstrukcijas laikā;
- 6) gaisa spraugas mērījumu veikšana dažādu turbīnu konstrukciju (Frensis, Kaplāna) hidroagregātiem;

7) iegūto rezultātu novērtēšanas metodikas izstrāde.

Pētījuma objekts un pētījuma priekšmets

Pētījuma objekts ir vertikāls hidroagregāts un hidroagregāta lēngaitas sinhronais hidroģenerators ar izvirzītiem poliem, pētījuma priekšmets — hidroģeneratora gaisa sprauga.

Zinātniskās novitātes un galvenie rezultāti šim darbam ir šādi:

- 1) izstrādāts matemātiskais modelis, kas apraksta gan hidroagregāta vibrācijas, gan hidroģeneratora gaisa spraugas atkarību no vibrācijām, ko turpmāk var izmantot galīgo elementu modelēšanai (GEM);
- 2) secināts, kādos gadījumos gaisa sprauga ir noteikti jānomēra, kad tas ir ieteicams un kad šāds mērījums nav nepieciešams;
- 3) uzkrāti un sistematizēti dati par gaisa spraugas defektu īpatnībām dažādas konstrukcijas hidroagregātiem;
- 4) izstrādāta rezultātu vizualizēšanas metodika, ņemot vērā hidroģeneratora rotora spieķu izvietojumu;
- 5) izstrādāta gaisa spraugas novērtēšanas metodika, lietojot spektrālo analīzi.

Pētījuma rezultātu aprobācija un praktiskais pielietojums

Par promocijas darba galvenajiem rezultātiem — gaisa spraugas novērtēšanas metodikas piemēriem, lietojot spektrālo analīzi, — ir publicēts raksts citējamā žurnālā «*Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*». Par citām ar darbu saistītām tēmām publicēti 11 raksti konferenču rakstu krājumos, no tiem 7 — citējamās izdevumos. Par darbu sniegti ziņojumi starptautiskās konferencēs Latvijā, Igaunijā, Šveicē un Krievijā.

Darbā izstrādātā mērīšanas metodika tika praktiski izmantota, veicot hidroģeneratora gaisa spraugas mērījumus uzturēšanas pārbaužu laikā. Darba tapšanas laikā piedāvātā mērīšanas metodika tika izmēģināta Daugavas HES hidroagregātiem. Darbā var izcelt atsevišķas daļas, kam ir izteikti praktiska nozīme.

- 1) Pirmajā nodaļā ir apkopots materiāls par gaisa spraugas defektiem, simptomiem un nevienmērīgas rotora un statora formas sekām. Informācija būs noderīga gan nākamajos mērījumos, gan tad, ja kādam no hidroagregātiem Daugavas HES kāskādē pēc rekonstrukcijas tiks uzstādīta nepārtraukta gaisa spraugas monitoringa sistēma.
- 2) Ir detalizēti aprakstītas tās hidroagregātu (HA) konstruktīvās īpatnības, kas ir svarīgas turpmākai matemātiskai un GEM modelēšanai.

- 3) Izstrādātais datorprogrammas kods tiek sekmīgi lietots mērīšanas datu apstrādei.
- 4) Izstrādātā metodika tiek lietota iegūto rezultātu novērtēšanai.

Pētījuma nozīme mašīnzinātnes nozarē un pētījuma specifika

Hidroagregātu tehniskā stāvokļa un vibrostāvokļa monitoringu regulē normatīvie akti, taču vienotas hidroģeneratoru vibrācijas teorijas izstrāde un diagnostika saistīta ar virkni neskaidrību, ko rada:

- 1) zemie agregāta apgriezieni;
- 2) liels skaits komponentu un apakšsistēmu, kas iedarbojas uz HA;
- 3) dažādu ražotāju agregātu īpatnības (izmērs un konstrukcija, izmantotie materiāli).

Šajā darbā attīstītas un pilnveidotas Kanādas, Igaunijas un Japānas autoru konferenču rakstu krājumos un Krievijas autoru promocijas darbos publicētās idejas par vienotas teorijas izstrādi sinhrono ģeneratoru tehniskā stāvokļa monitoringam ar gaisa spraugas palīdzību, lai tās varētu efektīvi izmantot Daugavas HES kaskādē uzstādītajiem agregātiem.

Pētījuma ierobežojumi

Šajā darbā nav apskatīta kavitācija un tās radītā turbīnas lāpstu vibrācija, kā arī HES pamatu kvalitāte. Šīs ir tēmas, par kurām nākotnē ieteicams veikt pētījumus Daugavas HES kaskādes hidroagregātu kontekstā.

Pētījuma teorētiskais un metodoloģiskais pamats

Pētījuma teorētisko un metodoloģisko pamatu veido ārvalstu autoru teorētiskās un praktiskās atziņas vibrodiagnostikas un gaisa spraugas monitoringa jomā, kā arī Latvijas autoru teorētiskās atziņas teorētiskās mehānikas jomā. Darba informatīvo bāzi veido dati no HES tehniskā arhīva un izpildedokumentācijas, normatīvie dokumenti (ISO, CEA, STO standarti).

Pētījuma uzbūve

Promocijas darba vispārīgā metodikai ir 4 posmi: literatūras analīze, matemātiskā modeļa izstrāde, eksperimenta un rezultātu novērtēšanas metodikas izstrāde.

Pētījuma metodes

Kā galvenā kvantitatīvā metode darbam kalpoja eksperimentu sērija 2014. gadā, lai dažādos darba apstākļos nomērītu gaisa spraugu diviem hidroagregātiem ar atšķirīgu turbīnu konstrukciju. Promocijas darba eksperimentam tika izvēlēta «konkrētas situācijas izpētes» (no angļu valodas «*Case study*») tipa metodoloģija. «Konkrētas situācijas izpētes» priekšrocība,

salīdzinot ar laboratorijas eksperimentu, ir tā, ka no redzesloka netiek izslēgts neviens ietekmes faktors, kas hidroagregātu diagnostikā ir īpaši svarīgi.

Datu apstrādei izmantotas kvantitatīvās un statistikas metodes. Ievada un literatūras apskata sadaļai izmantotas kvalitatīvās metodes, tai skaitā intervijas, analīze un salīdzināšana. Salīdzināšanas metodei bija būtiska nozīme darba tapšanā, tā izmantota, lai aprakstītu hidroagregātu iespējamus defektus un simptomus, kas par tiem liecina, pamatojoties uz citu pētnieku pieredzi. Intervijas metode izmantota, lai izprastu citu pētnieku aprakstītos rezultātus par sinhrono mašīnu gaisa spraugas modelēšanu. Analītiskā metode izmantota, pētot normatīvos aktus, lai nodefinētu gaisa spraugas novērtēšanas kritērijus.

Galvenās aizstāvēšanai izvirzītās tēzes

Apkopojot veiktā pētījuma rezultātus, var definēt šādas tēzes:

- 1) dinamiskais gaisa spraugas monitorings ir mūsdienīgāka un efektīvāka metode nekā statiskais gaisa spraugas monitorings. Piedāvātā metode ļauj efektīvāk veikt hidroagregāta (HA) stāvokļa monitoringu, kā arī atklāt konstrukcijas defektus;
- 2) vērtējot nomērīto HA gaisa spraugas nevienmērību kā efektīvu instrumentu, var izmantot gaisa spraugas spektrālo analīzi. Izstrādātā metode ļauj efektīvāk atklāt tādas konstrukcijas defektus kā ekscentricitāte, elipses forma, kā arī rotora spieķu vaļīgums;
- 3) izstrādātā gaisa spraugas monitoringa metode ir noderīgs instruments HA tehniskā stāvokļa novērtēšanai ilgtermiņā, kā arī tehniskā stāvokļa izvērtējumam un salīdzinājumam pirms un pēc remonta.

Darba struktūra

Darbā ir ievads, septiņas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts ar 132 citētiem avotiem. Darba apjoms ir 145 lappuses, ieskaitot 63 attēlus un 49 tabulas.

1. HIDROAGREGĀTU VIBRODIAGNOSTIKA

Nodaļā dots teorētisks apskats par gaisa spraugas monitoringu, tā vēsturi un attīstību mūsdienās. Parādīts, ka hidroagregāta lielo izmēru dēļ tam praktiski nav iespējams nodrošināt ideālu centrēšanu, taču spēki, kas rodas no nevienmērīgas gaisa spraugas, var nopietni ietekmēt HA darbu. Izpētīts, ka regulāri nomērīt gaisa spraugas nevienmērību rekomendēts gan HA apkopes «labās prakses» katalogā, gan HA rekonstrukcijas izpildedokumentācijā, tāpēc gaisa sprauga ir šā pētījuma priekšmets.

Gaisa sprauga ir nominālais vai nomērītais attālums starp hidroģeneratora rotoru un statoru, tēlaini izsakoties, tā ir «hidroagregāta sirds» [7], kur mehāniskā enerģija tiek pārvērsta elektriskajā strāvā. Lielo gabarītu dēļ ģeneratora izmēri var mainīties ekspluatācijas laikā, tāpēc mainās arī gaisa sprauga. Uz ģeneratoru tā darbības laikā iedarbojas vairāki spēki: centrālās spēki (t. s. centrifugālie spēki), t. s. termālie spēki, jo ģenerators ir pakļauts temperatūras ietekmei, vibrācija, magnētiskie spēki, elektriskais lauks, ģeotehniskie spēki. Visi šie faktori kopā ilgtermiņā var radīt lielu ietekmi uz ģeneratora darbu. Iemesls nevienmērīgai gaisa spraugai var būt ģeneratora konstrukcija, ekscentricitāte, disbalanss, vārpstas izliece (deformācija), atsevišķu detaļu nodilums, defekti ierosmes vai dzesēšanas sistēmā, kā arī temperatūras izmaiņas un spēki (hidrauliskais, centrālās, magnētiskais), kas ietekmē hidroagregātu. Ilgtermiņā nevienmērības iemesls var būt pat tādi ārējie faktori kā HES pamatu struktūras izmaiņas. Darbā biežākie iemesli apskatīti sīkāk, bet visvairāk uzmanības vēltis rotora un statora ekscentricitātei un elipses formai.

Darbā ir aprakstīti diagnostikas simptomi, kas liecina, ka HA ģeneratoram ir nevienmērīga gaisa sprauga. Visbiežākie simptomi, kas minēti dažādu autoru darbos, ir vārpstas paaugstināts vibropārvietojums, statora rāmja svārstības un paaugstināta otrās harmonikas vibrācija statora serdei, paaugstinātas amplitūdas HA gultņu vibropaātrinājuma spektra vērtībām, nevienmērīgs magnētiskais lauks, konstrukcijas detaļu nodilums un plaisas, tinumu izolācijas nodilums, plaisas rotora pola stiprinājuma vietās, rotora un statora serdes korozija, nevienmērīga silšana un gultņu bojājumi.

2. HIDROAGREGĀTA MATEMĀTISKAIS MODELIS

Nodaļā parādīts, ka hidroagregātu var attēlot kā svārstību sistēmu, kurai ir divi ierosmes avoti: turbīna (darba rats) un ģenerators. Kopumā matemātiskajā modelī, kas sadalīts divos neatkarīgajos ķermeņos, būs šādi elementi, kā attēlots 2.1. tabulā.

Pamata vienādojumi HA matemātiskajam modelim

HA elements	BP	Virziens	Vienādojums pamata formā
Ģeneratoram kā masai Nr. 2	Z2	Aksiāli	$[m_2]\{\ddot{x}_{z2}\} + [c_{aks}]\{\dot{x}_{z2}\} = \{F_{z,gen}\}$
	X2	Radiāli	$[m_2]\{\ddot{x}_{x2}\} + [c_{rad2}]\{\dot{x}_{x2}\} = \{F_{x,gen}\}$
	Y2	Radiāli	$[m_2]\{\ddot{x}_{y2}\} + [c_{rad2}]\{\dot{x}_{y2}\} = \{F_{y,gen}\}$
	Φ2	Rotācija	$[I_2]\{\ddot{\omega}\} + [c_{rad2}](\omega) = \{M_2\}$
Darba ratam (turbīnai) kā masai Nr. 1	X1	Radiāli	$[m_1]\{\ddot{x}_{x1}\} + [c_{rad1}]\{\dot{x}_{x2}\} = \{F_{x,dr}\}$
	Y1	Radiāli	$[m_1]\{\ddot{x}_{y1}\} + [c_{rad1}]\{\dot{x}_{y2}\} = \{F_{y,dr}\}$
	Φ1	Rotācija	$[I_1]\{\ddot{\omega}\} + [c_{rad1}](\omega) = \{M_1\}$

Nodaļā ir veikta matemātiskā modelēšana hidroagregātam kopumā, ņemot vērā Daugavas HES HA konstruktīvās īpatnības, kā arī sastādīti vispārīgie kustības vienādojumi, un apskatīti jau gatavi GEM modelēšanas piemēri no citu autoru darbiem.

Nodaļā parādīts, ka HA var modelēt kā sistēmu ar divām masām, bet to nevar modelēt kā sistēmu ar «cietiem balstiem». Hidroagregāta gultņu modelēšana ar «cietiem balstiem» nav pieļaujama vibrodiagnostikā, jo šāds pieņēmums neļauj korekti aprēķināt vārpstas šķērsvirziena pašsvārstību frekvenci. Parādīts, ka modelējot jānodala atsevišķi radiālais un aksiālais sistēmas stingums.

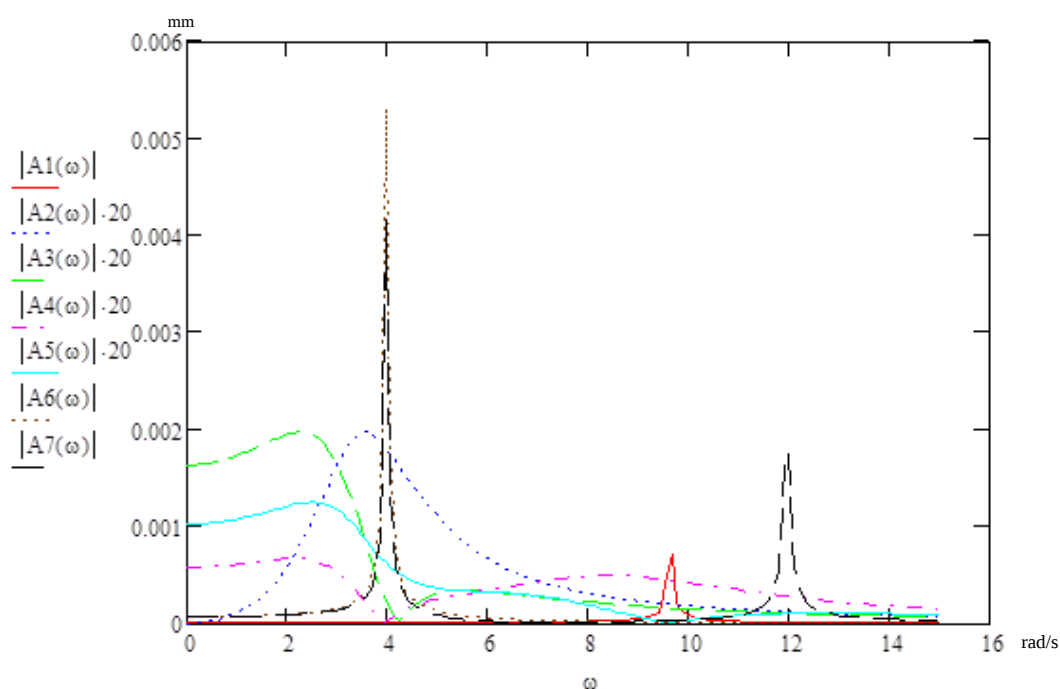
Secināts, ka ne darba ratam, ne ģeneratoram nevar veikt modelēšanu tikai ar vienu kustības brīvības pakāpi — rotāciju ap z asi, jo hidrauliskā un elektriskā disbalansa rezultātā jāņem vērā arī pārvietojums trijos virzienos.

3. SISTĒMAS KRITISKĀS FREKVENCES

Nodaļā ir parādīts, ka HA rezonanse var rasties gan konstruktīvo īpatnību dēļ, gan ekspluatācijas režīmu rezultātā. Ir aprēķinātas sistēmas pašsvārstību frekvences. Parādīts, ka hidroagregāta vārpstas modelēšanā jāņem vērā šādas īpatnības — rotējošas masas zemie apgriezieni, vertikāls vārpstas novietojums un stiprinājumu modelēšana ar reducētu stingumu. Apkopojot nodaļā ietvertos aprēķinus, kritiskās rotācijas frekvences p1–p7 no lieces un vērpes atrod ar determinantu (3.1.), to pielīdzinot nullei (kā homogēnai lineārai sistēmai ar septiņām kustības brīvības pakāpēm, ar amplitūdām a1–a7):

$$0 = \begin{bmatrix} a_1(-m_2 p^2 + C_{aks}) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_2(-m_2 p^2 + C_{rad2}) & a_3 C_{rad2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -a_2 C_{rad2} & a_3(-m_2 p^2 + C_{rad2}) & a_4 C_{rad1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -a_3 C_{rad2} & a_4(-m_1 p^2 + C_{rad1}) & a_5 C_{rad1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -a_4 C_{rad1} & a_5(-m_1 p^2 + C_{rad1}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_6(-J_2 p^2 + C_{rad2}) & a_6 C_{rad1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -a_6 C_{rad2} & a_7(-J_1 p^2 + C_{rad1}) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Attiecīgi — ierosinātu harmonisku svārstību ar frekvenci ω gadījumā katrai kustības brīvības pakāpei no nehomogēnas lineāras vienādojumu sistēmas atrod amplitūdas $A1(\omega)$ – $A7(\omega)$. Piemērs amplitūdu grafikiem no lieces un vērpes kustībām parādīts 3.1. att.



3.1. att. Piemērs uzspiesto svārstību amplitūdu grafikiem un sistēmas kritisko frekvenču zonu aprēķinam no lieces un vērpes *MathCAD* izpildījumā.

3.1. att. redzami gan lielu amplitūdu svārstību apgabali, gan arī svārstību dinamiskās slāpēšanas zonas. Dotie grafiki izskaidro eksperimentālo mērījumu spektra īpatnības. Nodaļā parādīts, kā mainās kritiskā rotācijas frekvence vērpe, atkarībā no bīdes moduļa. Secināts, ka vērpes svārstību pašsvārstību frekvence reālos mērījumos nav novērota, un tas ir izskaidrojams ar HA lielo konstrukcijas rezervi uz vērpes svārstībām.

Parādīts, ka kritisko rotācijas frekvenču uz lieci aprēķinam jālieto datormodelēšana, kur balsti ir elastīgi, jo pieņēmums, ka balsti ir stingi, nepamatoti palielina lieces pašsvārstību frekvences rezerves koeficientu $2 \div 3$ reizes.

4. GAISA SPRAUGAS MEHĀNISKĀ NEVIENMĒRĪBA

Nodaļā izstrādāts gaisa spraugas matemātiskais modelis un aprakstīti rotora un statora formas defekti, un secināts, ka hidroģeneratora statoru nevar korekti modelēt kā homogēnu

gredzenu un modelī jāņem vērā statora segmentu skaits. Pieņemot, ka ir nomērīta statora un rotora forma, kā arī no formas mērījumiem iegūti spektri, var sastādīt funkcijas (4.1.), kas apraksta rotora un statora nevienmērību:

$$\begin{cases} \phi_{st}(\varphi) = \frac{R_{st}(\varphi) - r_{st,1-6}}{g_0} = \sum_{k=1}^{12} \delta_{st,k} \cos(k\varphi - \gamma_{st,k}) \\ \phi_{rot}(\varphi') = \frac{R_{rot}(\varphi') - r_{rot,0}}{g_0} = \sum_{l=1}^{68} \delta_{rot,l} \cos(l\varphi' - \gamma_{rot,l}) \end{cases} \quad (4.1.)$$

kur $R_{st}(\varphi)$ — faktiskais statora rādiuss kādā punktā;

$r_{st,1-6}$ — projektētais statora rādiuss;

g_0 — gaisa spraugas vidējā vērtība;

$$\delta_{st,k} = \frac{r_{st,k}}{g_0}; \delta_{rot,l} = \frac{r_{rot,l}}{g_0}; g_0 = r_{st,0} - r_{rot,0}$$

Tad gaisa spraugas nevienmērība ir vienāda ar funkciju starpību (4.2.):

$$\Delta(\varphi, t) = \phi_{st}(\varphi) - \phi_{rot}(\varphi') = \sum_{k=1}^{12} \delta_{st,k} \cos(k\varphi - \gamma_{st,k}) - \sum_{l=1}^{68} \delta_{rot,l} \cos(l\varphi' - \gamma_{rot,l}) \quad (4.2.)$$

Tādejādi teorētiskā gaisa spraugas nevienmērība ir noteikta tad, ja ir noteikti lielumi $\delta_{st,k}$ un $\delta_{rot,l}$ (projektētā vērtība, dalīta ar vidējo).

Ja rotoram ir gan statiskā, gan dinamiskā ekscentricitāte, kas gandrīz vienmēr arī ir raksturīga hidroģeneratoriem, tad gaisa spraugu var izteikt ar formulu (4.3.):

$$g(t) = r_{st,0} - \delta_m g \cdot \cos(\beta_{din}) - \sqrt{r_{rot}^2 - (\delta_m g \cdot \sin(\beta_{din}))^2} \quad (4.3.)$$

kur δ_m — statiskās un dinamiskās ekscentricitātes rezultējošais nobīdes vektors;

β_{din} — laikā mainīgs leņķis;

g — projektētā gaisa sprauga.

Ja rotoram ir elipses forma, tad gaisa spraugu var izteikt ar formulu (4.4):

$$g_0 = r_{st,0} - \sqrt{\left[(r_{rot,0} + e) \cos\left(\frac{\omega t}{P} - \beta_{el}\right)\right]^2 + \left[(r_{rot,0} - e) \cos\left(\frac{\omega t}{P} - \beta_{el}\right)\right]^2} \quad (4.4.)$$

kur e — elipses novirze no apla formas;

β_{el} — laikā mainīgs leņķis;

ω — griešanās ātrums;

P — polu skaits, šajā darbā 68 un 108.

Rotora rādiusu iegūst no izteiksmes (4.5.):

$$R_{rot}(\varphi') = \begin{cases} r_{rot,0} + \sum_{l=1}^{68} r_{rot,AB} \cos(l\varphi' - \gamma_{rot,l}) \\ r_{rot,0} + \sum_{l=1}^{68} r_{rot,KK} \cos(l\varphi' - \gamma_{rot,l}) \end{cases} \quad (4.5.)$$

Statora rādiusu iegūst no vienādojumu sistēmas (4.6.):

$$R_{st}(\varphi) = \begin{cases} r_{st,1} + \sum_{k=1}^{12} r_{st,1} \cos(k\varphi - \gamma_{st,1}) \\ r_{st,2} + \sum_{k=1}^{12} r_{st,2} \cos(k\varphi - \gamma_{st,2}) \\ r_{st,3} + \sum_{k=1}^{12} r_{st,3} \cos(k\varphi - \gamma_{st,3}) \\ r_{st,4} + \sum_{k=1}^{12} r_{st,4} \cos(k\varphi - \gamma_{st,4}) \\ r_{st,5} + \sum_{k=1}^{12} r_{st,5} \cos(k\varphi - \gamma_{st,5}) \\ r_{st,6} + \sum_{k=1}^{12} r_{st,6} \cos(k\varphi - \gamma_{st,6}) \end{cases} \quad (4.6.)$$

kur $r_{st,1} \div r_{st,6}$ — statora rādiuss, kas nedaudz mainās atkarībā no režīma un temperatūras.

Katram no sešiem vienādojumiem $r_{st,1} \div r_{st,6}$ vērtības var atšķirties arī viena režīma ietvaros, jo stators silstot var izplesties nevienmērīgi, piemēram, segments, kurā atrodas generatora izvadi, var termiski izplesties mazāk nekā pārējie pieci segmenti.

Apkopotas aprēķinātās vērtības statora pašsvārstību frekvencei, ja statora serde ir atbilstoši nopresēta vai arī presējums ir vaļīgs. Tabulā 4.1. apkopotas aprēķina vērtības pirmā HA statora serdes pašsvārstību frekvencei ar presējumu bez defektiem.

4.1. tabula

Statora serdes pašsvārstību frekvence, darbojoties spēkam ar dažādu viļņa kārtu

j	1	2	3	4	5	6	68
ω_j (4.21), Hz	6,36	25,43	57,21	101,71	158,92	228,85	29 393,89
ω_{stat} (4.22), Hz	0,00	17,06	48,24	92,51	149,60	219,46	29 384,35

No tabulas 4.1. var secināt, ka statora pašsvārstību frekvence vistuvāk 100 Hz frekvencei atrodas tad, kad uz serdi iedarbojas spēks ar viļņa kārtu $j = 4$.

Ja statora serdes presējums nav pietiekami stings vai arī savienojumi starp segmentiem izplešas vairāk nekā paredzēts, mainās konstrukcijas materiāla īpašības, E samazinās līdz $0,3 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$, bet J — līdz 0,25 un attiecīgi mainās arī pašsvārstību frekvence, kā parādīts 4.2. tabulā:

4.2. tabula

Statora serdes pašsvārstību frekvence konstrukcijai ar defektu

j	1	2	3	4	5	6	68
ω_j (4.21), Hz	3,18	12,71	28,61	50,85	79,46	114,42	14 696,94
ω_{stat} (4.22), Hz	0,00	17,06	48,24	92,51	149,60	219,46	29 384,35

No tabulas 4.2. var secināt, ka statoram ar defektu pašsvārstību frekvence vistuvāk 100 Hz frekvencei atrodas tad, kad uz serdi iedarbojas spēks ar viļņa kārtu $j = 4 \div 6$.

Nodaļā parādīts, ka eliptiska statora serde, gultņu izdiluums un rotora disbalanss ir biežākie iemesli, kāpēc HA rodas statiskā ekscentricitāte.

No statora serdes pašsvārstību frekvenču aprēķina secināts, ka serdes pašsvārstību frekvence var atrasties pietiekami tuvu 100 Hz vibrāciju frekvencei, lai izsauktu rezonanses parādību. Jaunam statoram, kam plāksnes ir labi nopresētas, pašsvārstību frekvence vistuvāk 100 Hz atrodas, kad uz segmentiem darbojas spēks ar ceturto viļņa kārtu, bet statoram, kura konstrukcija vairs nav tik labā stāvoklī, pašsvārstību frekvenci tuvu 100 Hz var izraisīt spēks arī ar sesto viļņa kārtu (kas sakrīt ar statora segmentu skaitu).

5. MAGNĒTISKĀ LAUKA NEVIENMĒRĪBA

Nodaļā parādīts, ka hidroģeneratora rotora formas un gaisa spraugas, magnētiskā lauka nevienmērība un balstu konstrukciju vibrācija, kā arī statora serdes vibrācija ir cieši saistītas un ietekmē viena otru. Nodaļā aprakstīti magnētiskie spēki, kas darbojas uz hidroģeneratoru, un parādīts, ka hidroģeneratoram var nodalīt divus iemeslus nevienmērīgai magnētiskai plūsmai — īsslēgumu defektus un nevienmērīgas rotora formas defektus.

Parādīts, ka viens no svarīgākajiem pasākumiem HA monitoringā ir sekot, lai rotors atrodas statora centrā, tādējādi nodrošinot, ka magnētiskais lauka sadalījums gaisa spraugā ir pēc iespējas vienmērīgāks. Magnētisko spēku modelī parādīts, ka, lai novērstu statora serdes 100 Hz vibrāciju, dažreiz nepietiks tikai nopresēt statora serdes dzelzs plāksnes, lai mainītu rezonanses frekvenci. Pēc presēšanas var būt nepieciešama statora un rotora centrēšana vai statora serdes starp plākšņu izolācijas nomaiņa, lai mazinātu ietekmi no izlīdzinošās strāvas.

Aprēķinos parādīts, ka vibroātrums, ko hidroģeneratoram ar nepāra rievu skaitu uz polu un fāzi izraisa enkura reakcija un subharmonikas, ir lielāks nekā tas, ko izraisa galvenais magnētiskais lauks, bet kopumā galvenā magnētiskā lauka un visu izraisīto subharmoniku summai ir maza vērtība, salīdzinot ar pieļaujamo, kā arī ar faktiski nomērīto vibrāciju.

6. GAISA SPRAUGAS MĒRĪŠANA

Nodaļā aprakstīts eksperiments, kas veikts diviem HA, kam tika nomērīta rotora forma, EDS, vibrācija un temperatūra, kā arī reģistrēti iekārtas apgriezieni. Pirmā HA mērījumi veikti 2014. gada pavasarī un rudenī, un agregātam šajā posmā nav veiktas nekādas konstruktīvās izmaiņas. Otrā HA mērījumi veikti 2014. gada pavasarī un rudenī, taču laika

posmā starp mērījumiem HA tika veikts uzturēšanas remonts. Tādejādi pirmā HA mērījumi nodrošināja pārbaudi rezultātu atkārtojamībai, bet otrā HA mērījumi ļāva analizēt viena HA tehniskā stāvokļa atšķirību pirms un pēc remontdarbiem.

7. GAISA SPRAUGAS NOVĒRTĒŠANA

Nodaļā secināts, ka laika gaitā pieļaujamie lielumi gaisa spraugas nevienmērībai ir samazinājušies no 20 % uz 3 %. Nodaļā apskatītas dažādas gaisa spraugas novērtēšanas iespējas — pēc standartiem, pēc minimālās vērtības no apla diagrammas, pēc vibrācijas, kā arī spektrālā diagnostika. Novērtēšanu pēc STO un CEA publicētiem standartiem un materiāliem apkopotī sekojošā 7.1. tabulā:

7.1. tabula

Rotora formas nevienmērības novērtējums		
STO	CEA	Novērtējums
< 3 %	6 %	Apmierinoši
3–8 %	6 %–8 %	Neapmierinoši
> 8 %	> 10 %	Nepieļaujami

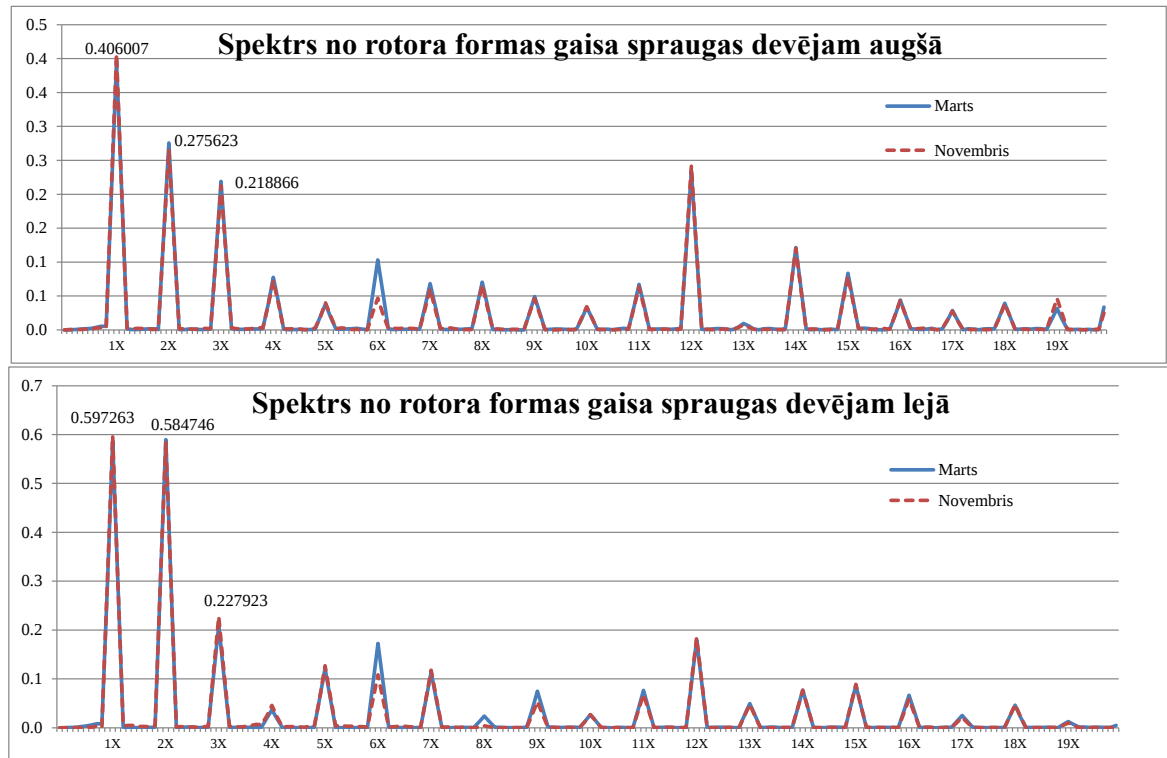
Darbā ir atklāts, ka novērtējums būtiski atšķiras tad, ja vērtē atsevišķi rotora formu tā augšdaļā un apakšdaļā, un tad, ja vērtē vidējo matemātisko vērtību. Vērtējot vidējo matemātisko vērtību, novērtējums var būt apmierinošs, bet vērtējot atsevišķi formu augšdaļā un apakšdaļā, neapmierinošs. Secināts, ka monitoringam un novērtēšanai var lietot vidējo vērtību, bet diagnostikai vairāk informācijas var iegūt, apstrādājot vērtības atsevišķi augšdaļā un apakšdaļā. Secināts, ka HA darba režīmi būtiski neietekmē mērījuma rezultātus, jo novērtējums ir līdzīgs visos iespējamajos HA režīmos.

Zinot, kāds ir lielākais statora un rotora izvirzījums, var noteikt, kāda ir garantētā gaisa sprauga. Nodaļā parādīts, kā informāciju no polārās diagrammas var lietot garantētās gaisa spraugas aprēķinam.

Parādīts, ka informāciju par rotējošas mašīnas ekscentricitāti var nolasīt no vibrāciju spektra diagrammas pirmās un otrās harmonikas.

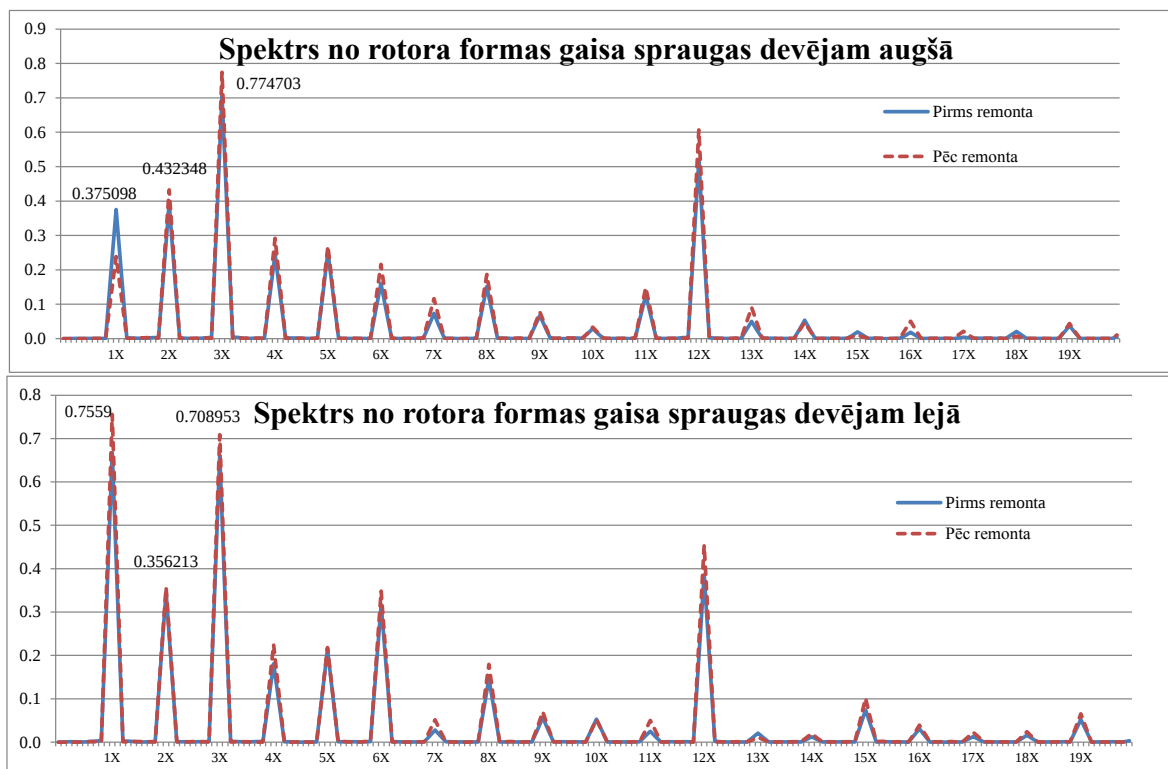
Nodaļā aprakstīta jauna gaisa spraugas nevienmērības novērtēšanas metodika, izmantojot spektru. Iegūtie rotora formas rezultāti tika sadalīti Furjē rindā, kur 1. harmonika ir ekscentricitāte; 2. harmonika ir eliptiskums; 3. harmonika ir trīsstūrāinība; 4. harmonika ir kvadrātiskums.

Iegūtie spektra rezultāti pirmā HA 2014. gada marta un novembra mērījumiem praktiski neatšķiras. Spriežot pēc spektra 7.1. att., kas iegūts rotora formai režīmā 90MW 0 MVar, rotora formai tā apakšdaļā ir nenozīmīgs (~3 %) eliptiskums, par ko liecina 2. harmonika apakšējā devēja spektra grafikā.



7.1. att. Pirmā HA rotora formas jeb gaisa spraugas spektrs.

Otrā HA gaisa spraugas spektra rezultāti doti 7.2. att., kur redzams, ka pirms un pēc remonta nevienmērība atšķiras par aptuveni 0,2 mm.



7.2. att. Otrā HA rotora formas spektrs pirms un pēc remonta.

SECINĀJUMI

Darbā ir risinājumi par uzdevumiem, kas tika izvirzīti, lai sekmīgi papildinātu Daugavas HES kaskādes HA vibrodiagnostiku ar gaisa spraugas monitoringu. Risinot šos uzdevumus, izstrādāti matemātiskie modeļi gan HA diagnostikai kopumā, gan atsevišķi gaisa spragai, veikti gan teorētiski, gan uz eksperimentiem pamatoti aprēķini. Galvenie secinājumi, kas izdarīti darba gaitā, ir šādi:

- 1) rotora formas un gaisa spraugas nevienmērību ir ieteicams mērīt tad, ja atklāts vismaz viens no simptomiem (paaugstināta vibrācija, korozija uz statora serdes u. c.), kas liecina, ka rotoram piemīt liela ekscentricitāte vai nevienmērīga forma;
- 2) ņemot vērā Daugavas HES HA konstruktīvās īpatnības, matemātiskajā modelī katrai rotējošai masai jāapraksta četras kustības brīvības pakāpes;
- 3) gultņus nav pieļaujams modelēt kā «cietus balstus» vai vienu elastīgo elementu;
- 4) veicot svārstību modelēšanu, jāņem vērā atsevišķi radiālais un aksiālais sistēmas stingums;

- 5) kritiskā rotācijas frekvence uz vērpi zīmīgi mainās atkarībā no bīdes moduļa, tāpēc pirms matemātiskās modelēšanas sākšanas jābūt precīzai informācijai par HA rotora vārpstas materiālu;
- 6) kritisko rotācijas frekvenču uz lieci aprēķinam jālieto datormodelēšana, ievērojot, ka balsti ir elastīgi, jo pieņēmums, ka balsti ir stingi, nepamatoti palielina lieces pašsvārstību frekvences rezerves koeficientu $2 \div 3$ reizes;
- 7) statora serdes elipses forma, gultņu izdiluums ir biežākie iemesli, kāpēc HA rodas statiskā ekscentricitāte, tādēļ nav pieļaujams ģeneratora statoru modelēt kā homogēnu gredzenu;
- 8) nepietiekamu kompresijas spēku gadījumā starp statora dzelzs plāksnēm statora serdes pašsvārstību frekvence var tuvojies 100 Hz, kas var izraisīt rezonanses parādību;
- 9) rekonstrukcijas rezultātā palielināts pirmā HA ģeneratora rievu skaits, taču vibrāciju subharmonikas, ko šāda konstrukcija ierosina, nav galvenais statora paaugstinātas vibrācijas iemesls;
- 10) vienlaikus nomērot rotora formu un elektrodzinējspēku, var konstatēt, vai kādam rotora tinumam nav īsslēgums;
- 11) korektam rezultātam nepieciešams reģistrēt vidējo vērtību no astoņiem rotora formas mērījumiem, signālu filtra augšējā un apakšējā robeža jāuzstāda, ņemot vērā HA nominālos apgriezienus;
- 12) gaisa spraugas mērījumiem vēlams lietot četrus kapacitīvos devējus;
- 13) nav viena konkrēta režīma, kurā vislabāk veikt rotora formas mērījumus, jo defektu diagnostiku visoptimālāk veikt dažādos režīmos;
- 14) novērtējot rotora formas nevienmērības vidējo vērtību, rezultāts būs labāks, jo aprēķinātā novirze būs mazāka, nekā novērtējot vērtības atsevišķi rezultātam no devējiem augšdaļā un apakšdaļā. Vidējo vērtību var lietot monitoringa laikā, bet diagnostikas mērķiem jāvērtē katrs pils augšdaļā un apakšdaļā;
- 15) Pilnvērtīgai gaisa spraugas nevienmērības novērtēšanai vēlams veikt arī statora formas mērījumu;
- 16) rotora formas nevienmērības rezultātu polāro diagrammu vislabāk attēlot uz rotora spieķiem;

- 17) jauna novērtēšanas metodika, lietojot gaisa spraugas spektra analīzi, ir ērts instruments, kā novērtēt HA tehnisko stāvokļa izmaiņas laika gaitā vai pirms un pēc remontdarbiem.

GALVENO IZMANTOTO AVOTU SARAKSTS

- [1] LEK 057. 2008. Metodiskie norādījumi hidroagregātu vibrāciju pārbaudēm.
- [2] ISO 10816-5:2000. Mehāniskā vibrācija — vibrāciju vērtējums, mērot uz nerotējošām daļām — Mašīnu kompleksi hidrospēkstacijās un sūkņu stacijās.
- [3] Guide for Erection Tolerances and Shaft System Alignment. 1989. Canadian Electrical Association, (CEA) (Guide technique-Division Études et Normalisation, VP Ingénierie HQ).
- [4] STO 17330282.27.140.001-2006. Methods for Evaluating the Technical Condition of Major Hydroelectric Plant Equipment (Krievu valodā: Стандарт ОАО PAO «Методики оценки технического состояния основного оборудования гидроэлектростанций»).
- [5] Кеpe O., Vība J. Teorētiskā mehānika. – Rīga: Zvaigzne, 1982. – 577 lpp.
- [6] Bettig B. P, Han R. P. S. Modeling the Lateral Vibration of Hydraulic Turbine Generator Rotors// Journal of Vibration and Acoustics. – 1999. – Vol. 121. – 322.– 327. pp.
- [7] Bissonnette M. R., Jackson L. 10 Case studies of on-line monitoring & diagnostics on hydroelectric machinery// Dobbie Conference, Boston MA, 1999.
- [8] Kangro R., Vaimann T., Kallaste A., Belahcen A. Air-Gap Eccentricity Analysis of Slow-Speed Slotless Permanent Magnet Synchronous Generator// Proceedings of Electric Power Quality and Supply Reliability Conference PQ 2014. – Rakvere, 2014. – 225. – 228. pp.
- [9] Moore V. A. Experience with Large Hydro-Generators at Grand Coulee// Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions. – 1983. – Vol. PAS-102, Iss.10. – 3265.– 3270. pp.
- [10] Pollock G. B., Lyles J. F. Vertical hydraulic generators experience with dynamic air gap monitoring// IEEE Transactions on Energy Conversion. – 1992. – Vol. 7, No. 4. – 660. –668. pp.
- [11] Okazaki S., Fujio N. Excessive Shaft Throw Problem of Generators for Kpong Generating Station, VRA, Ghana// IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1983. – Vol. PAS-102, Iss.9. – 3226.–3231. pp.

- [12] Sawatani K., Kenzo S., Shigeru O. Stator Frame Deformation Problem in Large Diameter Hydro-Generators// IEEE Transactions on Energy Conversion. – 1986. – Vol.EC-1, Iss.1. – 33.–38. pp.
- [13] Talas P., Toom P. O. Dynamic measurement and analysis of air gap variations in large hydroelectric generators// IEEE Trans. on Power Apparatus and System. – 1983. – Vol.PAS-102, No.9. – 3098–3106 pp.
- [14] Yin R. K. Case study research, Design and Methods, Fifth Edition. London: SAGE publications, 2013. – 312 p.
- [15] Александров А. Е. Подпятники гидроагрегатов. – Москва: Энергия, 1975. – 289 с.
- [16] Андреев В. Б., Броновский Г. А., Веремеенко И. С. Справочник по гидротурбинам. – Ленинград: Машиностроение, 1984. – 495 с.
- [17] Владиславлев Л. А. Вибрация гидроагрегатов гидроэлектрических станций. – Москва: Энергия, 1972. – 176 с.
- [18] Иванченко И. П., Прокопенко А. Н. Вибрационная диагностика гидротурбин. В кн. Диагностика турбинного оборудования электрических станций. Под ред. Л. А. Хоменка. – Санкт-Петербург: ПЭИПК. – 2004. – 223.–262. с.
- [19] Ковалев Н. Н. Справочник по гидротурбинам. – Ленинград: Машиностроение, 1984. – 498 с.
- [20] Кривченко Г. И. Гидравлические машины. Турбины и насосы. Учебник для вузов. – Москва: Энергия, 1978. – 320 с.
- [21] Петров Ю. В. Исследование вибраций статоров крупных гидрогенераторов, возбуждаемых силами магнитного притяжения. – Москва: ВНИИЭ, 1976. – 208 с.
- [22] Прокопенко А. Н. Расчётно – экспериментальное обоснование зависимости вибрационных характеристик гидроагрегатов от конструктивных и режимных факторов. – Санкт-Петербург: СПГПУ, 2014. – 221 с.
- [23] Шубов И. Г. Шум и вибрация электрических машин, 2-е изд. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1986. – 208 с.